

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y
Estructuras



***SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO
DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACEROS CON
TRANSFORMACIÓN DE FASE POR
DEFORMACIÓN PLÁSTICA***

Autor: Maria Elia Angulo Vázquez

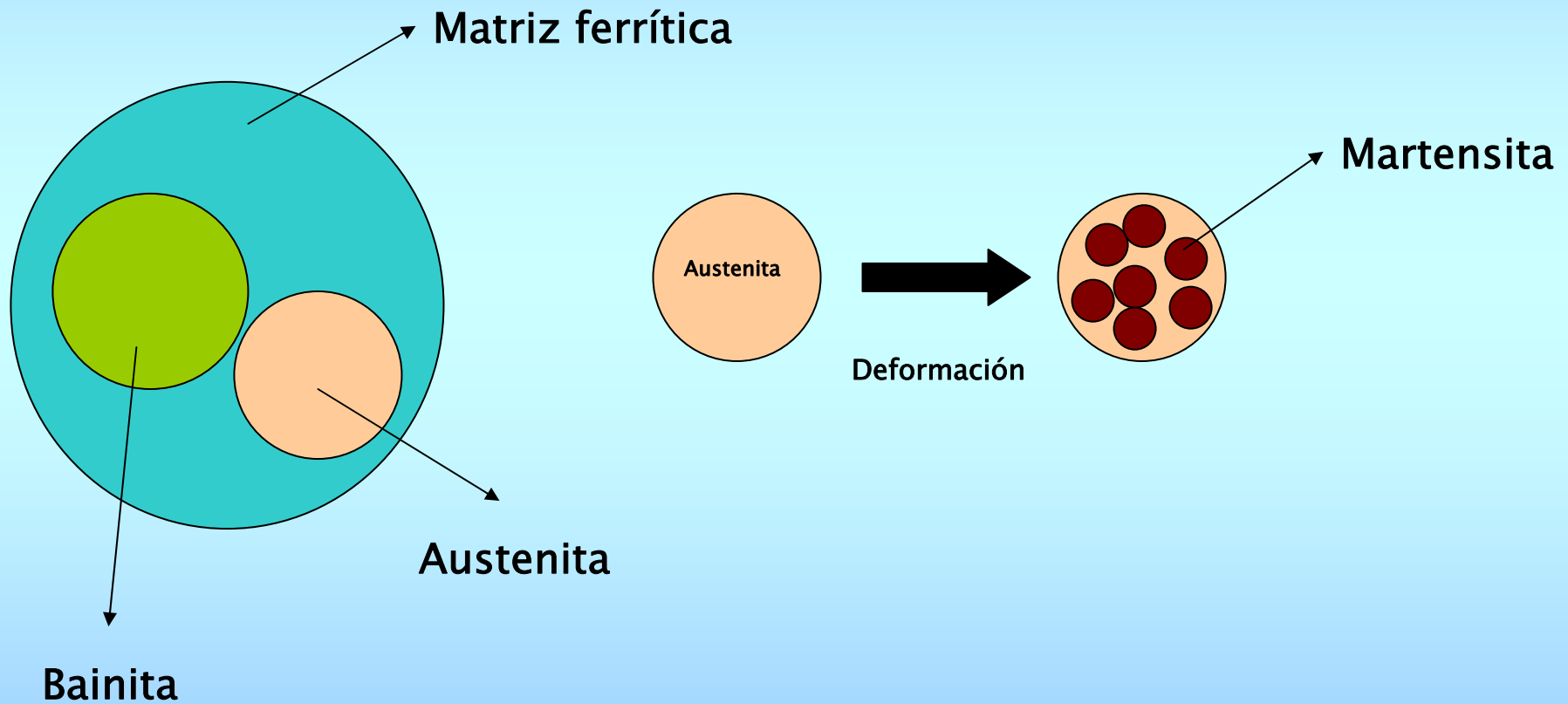
- 1. Objetivos
- 2. Antecedentes
- 3. Modificaciones propuestas
- 4. FEM (Finite Element Method)
- 5. Resultados obtenidos
- 6. Conclusiones
- 7. Trabajos futuros

1. Objetivos

- Estudio de comportamiento de los aceros TRIP
- Comparación de los aceros TRIP con los acero convencionales
- Efecto de la predeformación en los aceros TRIP

2. Antecedentes


Acero TRIP



Buena combinación de resistencia y ductilidad

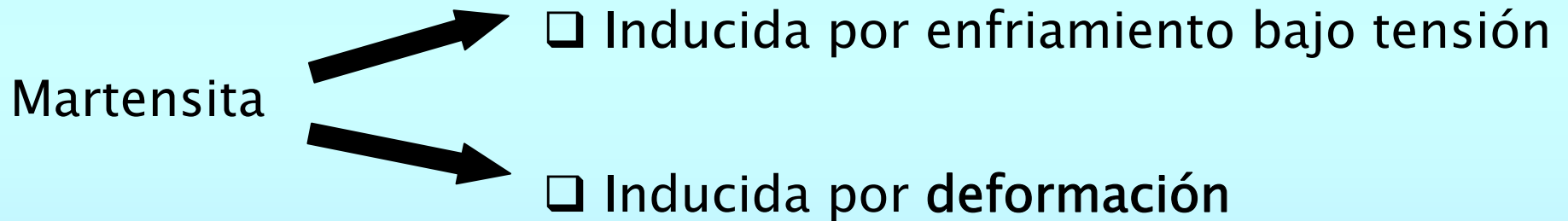
2. Antecedentes

MODELOS CONSTITUTIVOS
PARA LOS ACEROS TRIP

- 
- Olson y Coen
 - Stringfellow
 - Tomita e Iwamoto
 - Serri
 - Aravas

➤ Olson y Coen

Fueron los primeros en proponer un modelo constitutivo para los aceros TRIP



Debida a nuevos lugares de nucleación a causa de la deformación plástica.

Intersección de las bandas de cortante

$$f^{sb} = 1 - \exp(\alpha \varepsilon)$$

Proliferación de las bandas de cortante conforme se deforma el material

$$N_v^{sb} = \frac{f^{sb}}{v^{sb}}$$

Nº de bandas de cortante por unidad de volumen

$$N_v^I = K(N_v^{sb})^n$$

Nº de intersecciones de la bandas de cortante por unidad de volumen

$$dN_v^{\alpha'} = p dN_v^I$$

Incremento de embriones martensíticos

Probabilidad de que una intersección se convierta en embrión martensítico (integral de una función de distribución gaussiana dependiente de la temperatura)

Considerando constante el volumen específico de cada unidad de martensita se puede relacionar el incremento del contenido en martensita con la aparición de nuevos embriones

$$df^{\alpha'} = (1 - df^{\alpha'}) \bar{v}^{\alpha'} dN_v^{\alpha'}$$

Fracción volumétrica de martensita en función de la deformación plástica

$$f^{-\alpha'} = 1 - \exp(-\beta(1 - \exp(-\alpha\varepsilon))^n)$$

dependientes de la temperatura

➤ Stringfellow

Características del modelo

- Para Stringfellow la deformación no es la misma para todas las fases, debido a la diferencia de resistencia a la deformación plástica de cada una de ellas.
- Olson y Coen no tienen en cuenta el estado tensional
- Evolución de la martensita es función de la temperatura, la deformación plástica y el estado tensional.
- La martensita hereda la subestructura de dislocaciones de la austenita madre. **por tanto, cuanto mayor sea la deformación plástica de la austenita, más dura será la martensita transformada**

VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE MARTENSITA

$$\dot{f} = (1 - f)(A_f \gamma_a + B_f \dot{\Sigma})$$

$$A_f = \alpha \beta_0 r P (f^{sb})^{r-1} (1 - f^{sb})$$

$$B_f = \eta \frac{g_2}{\sqrt{2\Pi s_g}} \beta_0 (f^{sb})^r \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{g - \bar{g}}{s_g}\right)^2\right] H(\dot{\Sigma})$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^g \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{g' - \bar{g}}{s_g}\right)^2\right] dg'$$

$$g = g_0 - g_1 \theta + g_2 \Sigma$$

Depende de la temperatura y del estado tensional

➤ Tomita e Iwamoto

- Además de la temperatura, tienen en cuenta el trabajo plástico
- Concluyen que:

LA FRACCIÓN
VOLUMÉTRICA
DE MARTENSITA

Disminuye con la temperatura

Aumenta a bajas deformaciones

Disminuye a altas deformaciones

La resistencia a tracción decrece conforme aumenta la temperatura

➤ Aravas

- La martensita producida por deformación plástica de la austenita tiene lugar en las bandas de cortante entre dos temperaturas: M_s y M_d
- El modelo recoge las cuatro fases presentes en el acero: austenita, bainita, ferrita y martensita
- Considera endurecimientos distintos para cada fase y por tanto deformaciones plásticas distintas
- El modelo incluye el trabajo plástico irreversible y su incremento térmico asociado
- No tiene en cuenta el endurecimiento por velocidad de deformación ni el ablandamiento por temperatura

$$D = D^e + D^p + D^{TRIP}$$

Material prácticamente homogéneo en esta zona.
Modelo hipoeelástico isotrópico lineal

$$\sigma = L^e : D^e$$

Tiene componentes hidrostática y desviadora y es proporcional al aumento de la fracción de martensita

$$D^{TRIP} = A \dot{f} N + \frac{1}{3} \frac{\dot{\epsilon}^p}{v} \delta$$

Definida mediante un proceso de homogeneización para materiales compuestos no lineales

$$D^p = \frac{1}{2} \theta^{\text{hom}}_S$$

Proceso de homogeneización.

Se supone que no hay cambio de volumen en la deformación plástica ecuaciones se escriben en forma de un potencial viscoso que depende de la tensión equivalente.

$$\begin{array}{l}
 \boxed{1} \quad \theta^{(r)} = \frac{3}{\sigma_{eq}} \frac{\partial \psi^{(r)}}{\partial \sigma_{eq}} \\
 \boxed{2} \quad \sigma_{eq}^{(r)} = \sigma_{eq} \sqrt{\frac{1}{c^{(r)}} \frac{\partial \Theta^{hom}}{\partial \Theta^{(r)}}} = b^{(r)} \Theta \sigma_{eq}
 \end{array}
 \left\{ \frac{1}{\theta^{hom}} = \left(\sum_{r=1}^4 \frac{\frac{c^{(r)}}{\theta^{(r)}}}{\frac{1}{\theta^{(r)}} + \frac{3}{2\theta^{(4)}}} \right) \left(\sum_{r=1}^4 \frac{c^{(r)}}{\frac{1}{\theta^{(r)}} + \frac{3}{2\theta^{(4)}}} \right) \right.$$

Factor que refleja el estado de tensiones que se produce en la fases

3. Modificaciones propuestas

$$D = D^e + D^p + D^{TRIP} + D^\theta$$

Inclusión de la deformación por temperatura

$$D^\theta = \alpha_T \dot{\theta} I$$

siendo

Coef. Quinney -Taylor

$$\dot{\theta} = \eta \frac{\sigma : \dot{\varepsilon}^p}{\rho c_v}$$

El límite elástico se corrige para tener en cuenta endurecimiento por deformación y el ablandamiento por temperatura.

$$\sigma_y = \left(A + B(\varepsilon_p)^N \right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{\frac{1}{M}} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{-\nu}$$

3. FEM

- Se ha elegido el programa de elementos finitos **Abaqus** debido a su gran versatilidad.
- Concretamente se ha utilizado **Abaqus/Explicit** debido a que el análisis que se ha hecho es no lineal.
- Con **Abaqus/Explicit** se puede **capturar mejor la respuesta dinámica** de una estructura que cambia rápidamente

4. Resultados obtenidos

Probeta de tracción

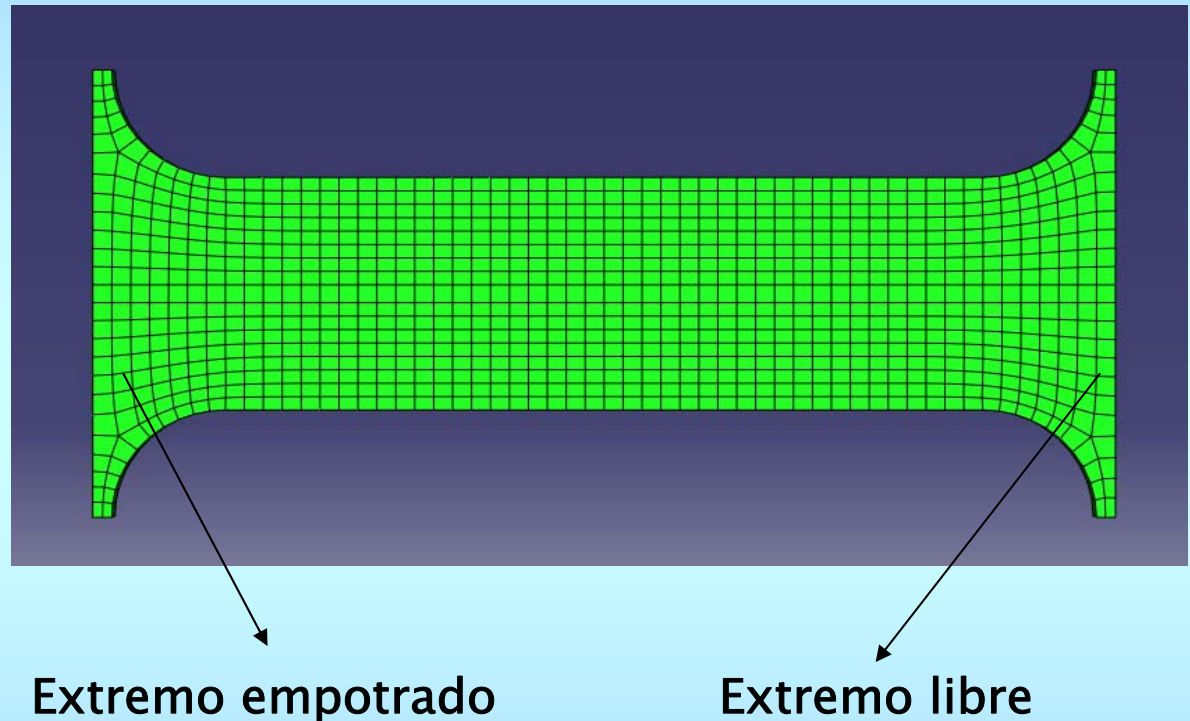
952 elementos y 2086 nodos.

3 velocidades de ensayo:

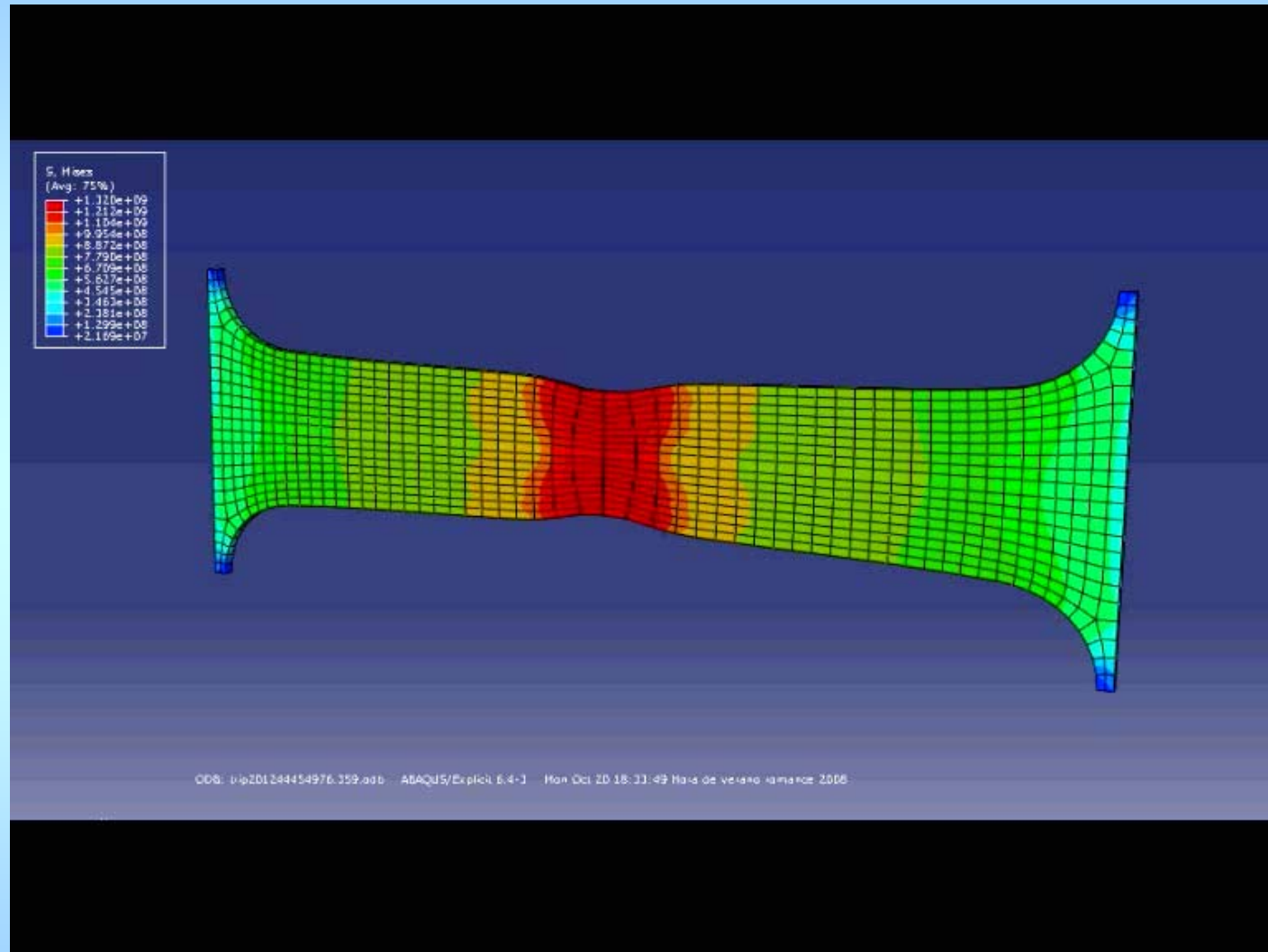
- 0.2m/s
- 2m/s
- 20m/s

3 configuraciones:

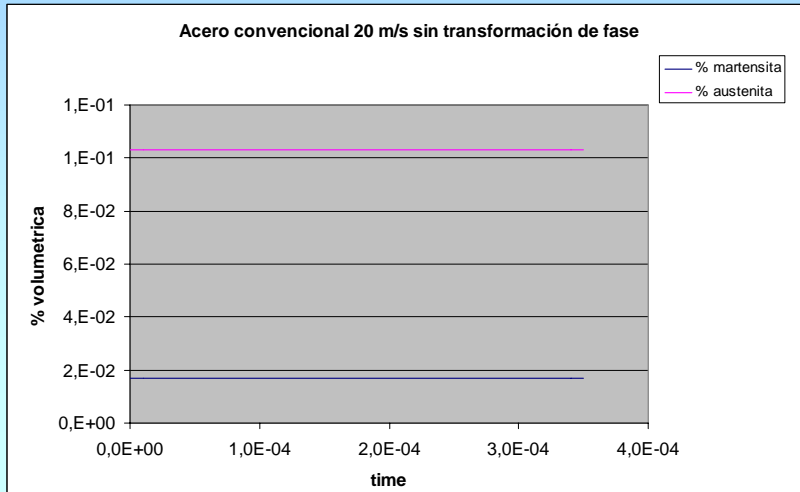
- Acero TRIP
- Acero convencional
- Acero TRIP con predeformación uniaxial del 10% en régimen isoterma



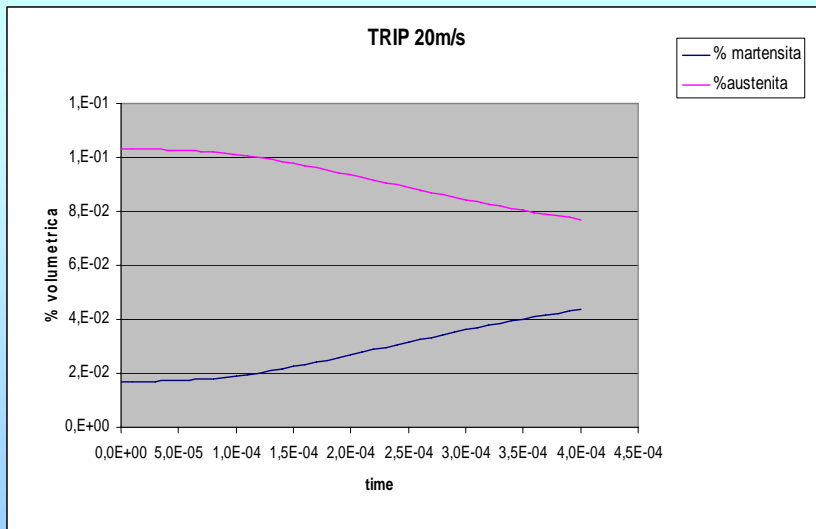
Simulación con Abaqus



Variación del contenido de austenita y martensita durante la deformación

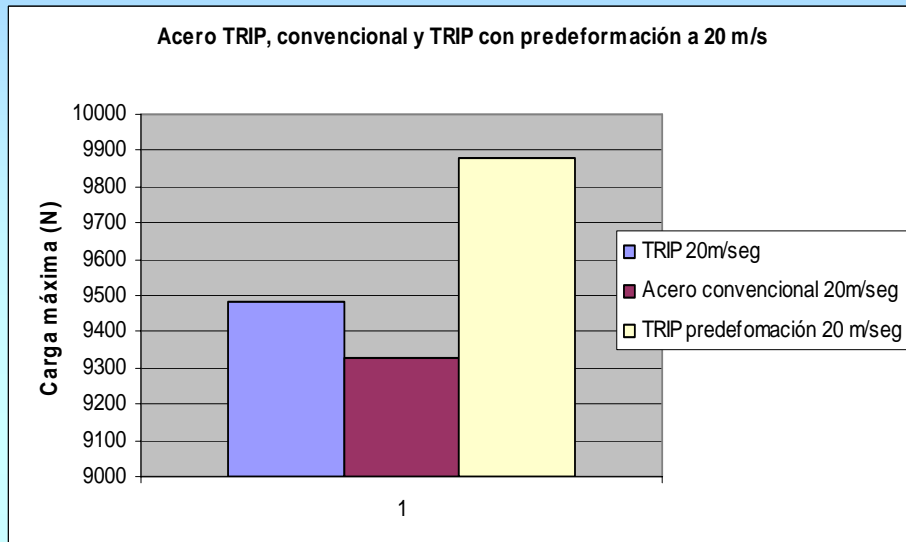


Acero convencional



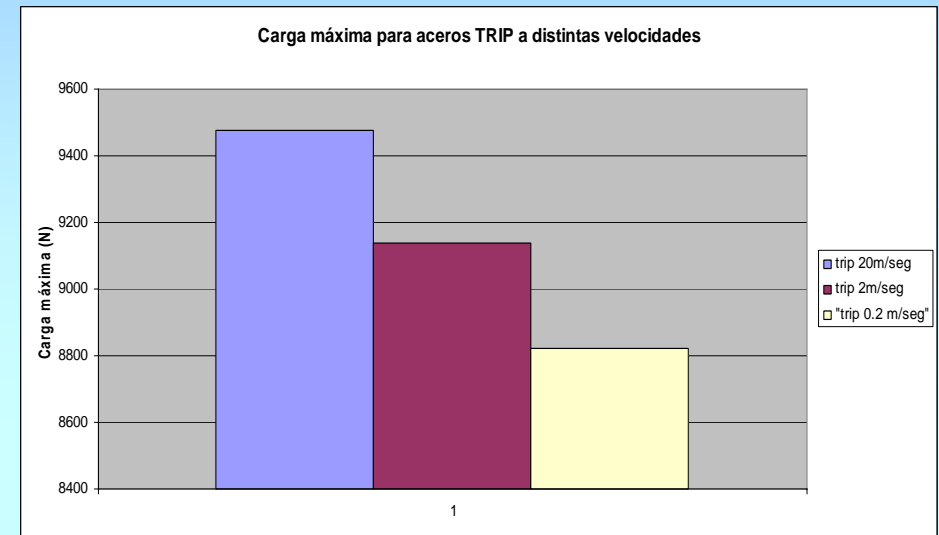
Acero TRIP

Carga máxima



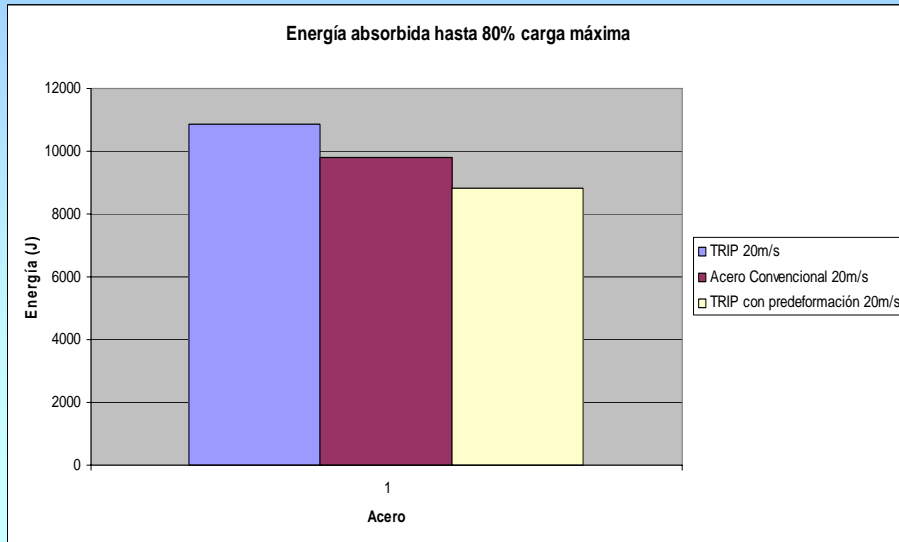
El acero TRIP soporta mayor carga máxima que el acero convencional para una misma velocidad de deformación

Durante la mayor parte de la simulación, el acero TRIP con predeformación alcanza mayor carga que el TRIP sin predeformar



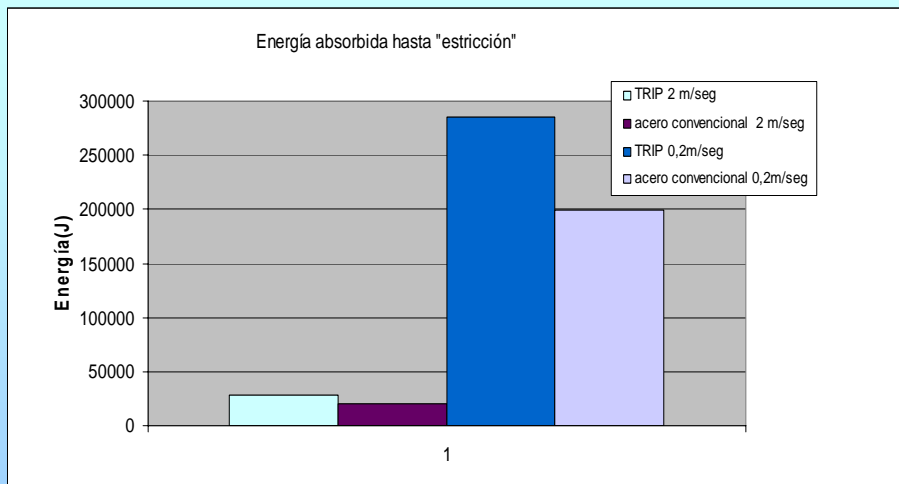
A mayor velocidad de deformación, mayor carga máxima soportada

Energía absorbida



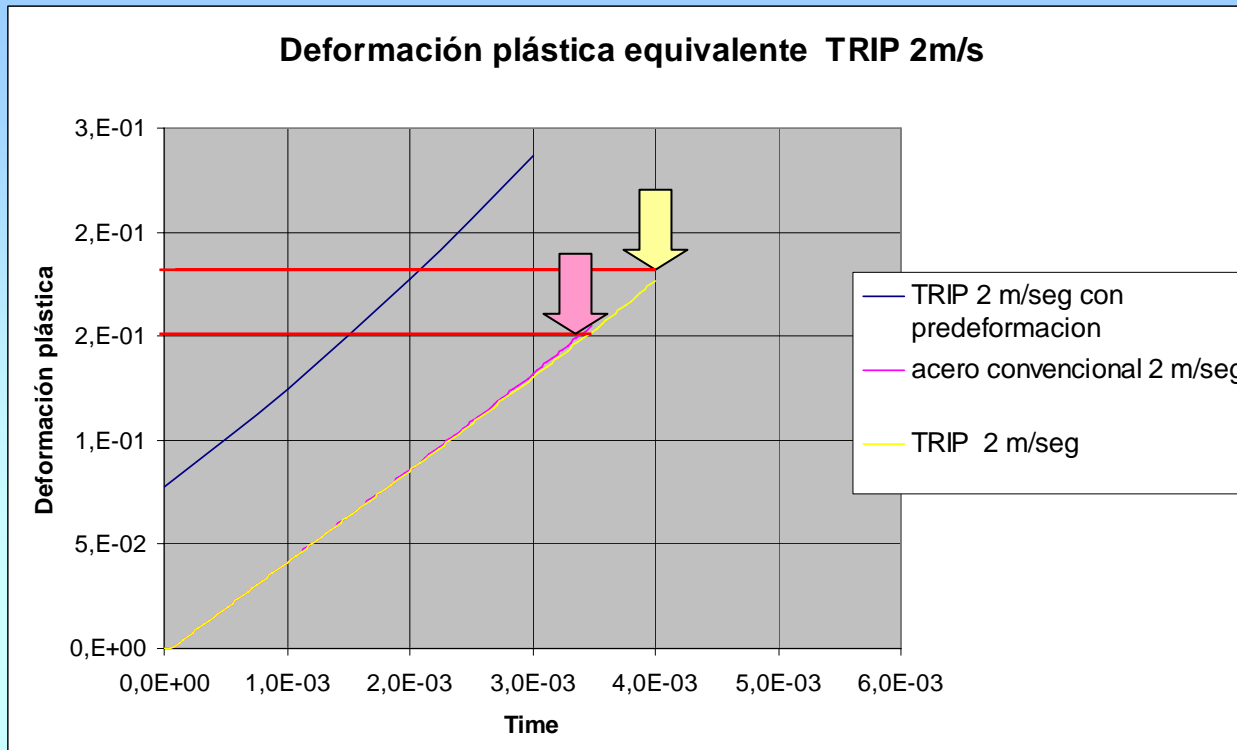
La energía absorbida por el acero TRIP es mayor que la absorbida por el acero convencional.

La predeformación no mejora la capacidad de absorción de energía



A menor velocidad mayor energía absorbida

El acero TRIP tarda más en llegar a la estricción que el convencional



t estr. TRIP= $4e-3$ s

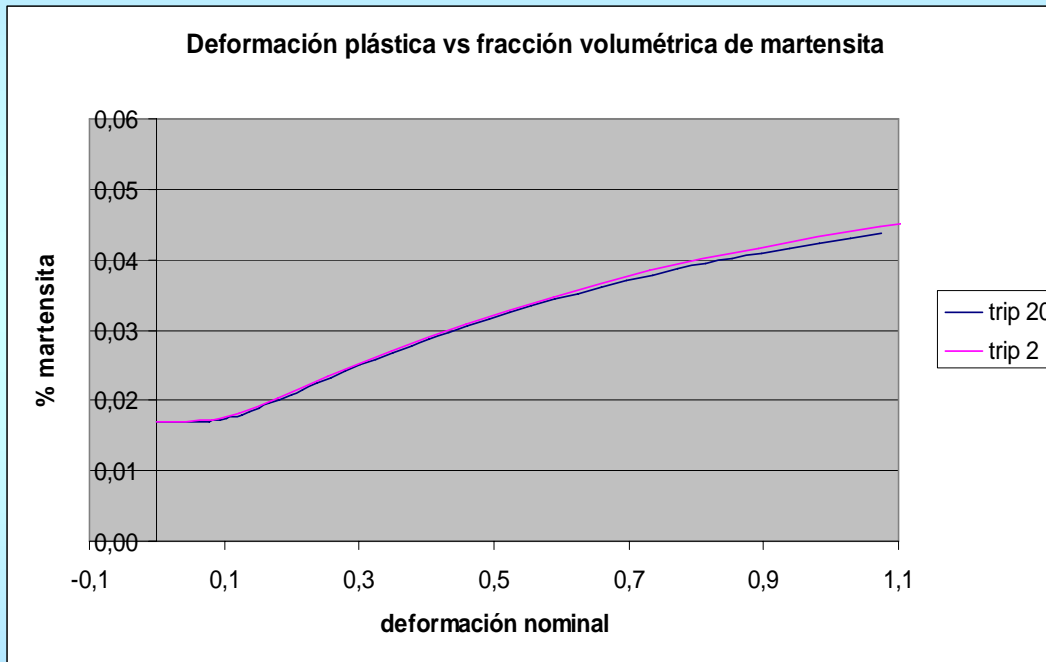
t estr. acero convencional= $3.4e-3$ s

t estr. TRIP predef.= $1.75e-3$ s

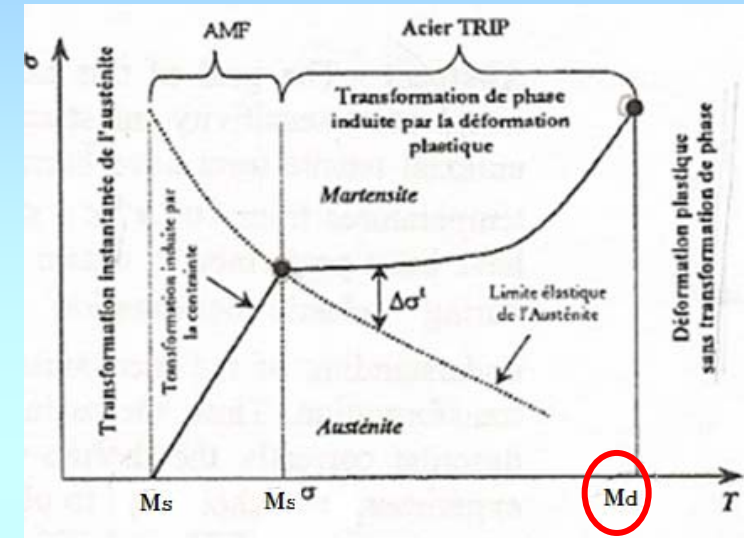
La deformación plástica equivalente es mayor para el acero TRIP en el momento de alcanzar la estricción que para el acero convencional. Esto confirma que la energía absorbida también sea mayor, mayor capacidad de controlar propagación de fisuras

Influencia de la velocidad de deformación

Elemento de control en el centro de la probeta

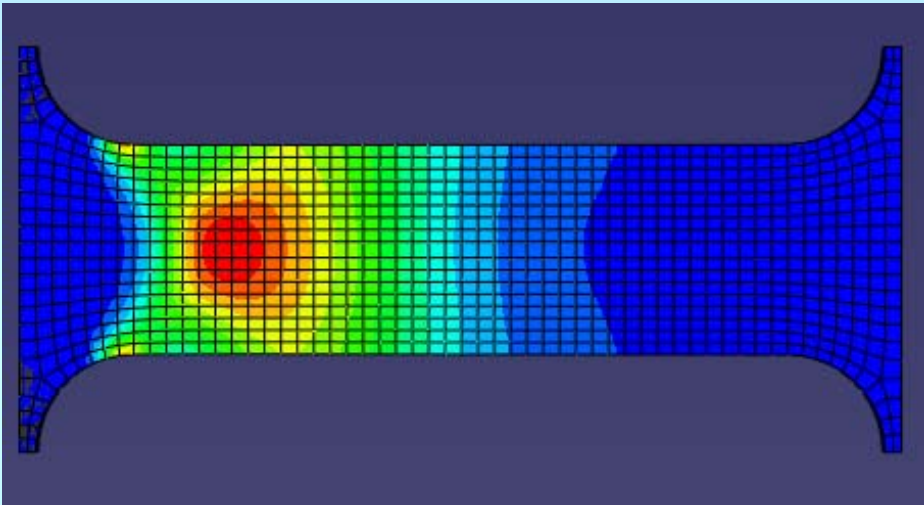


Una baja velocidad de deformación conlleva un cambio de fase mayor.

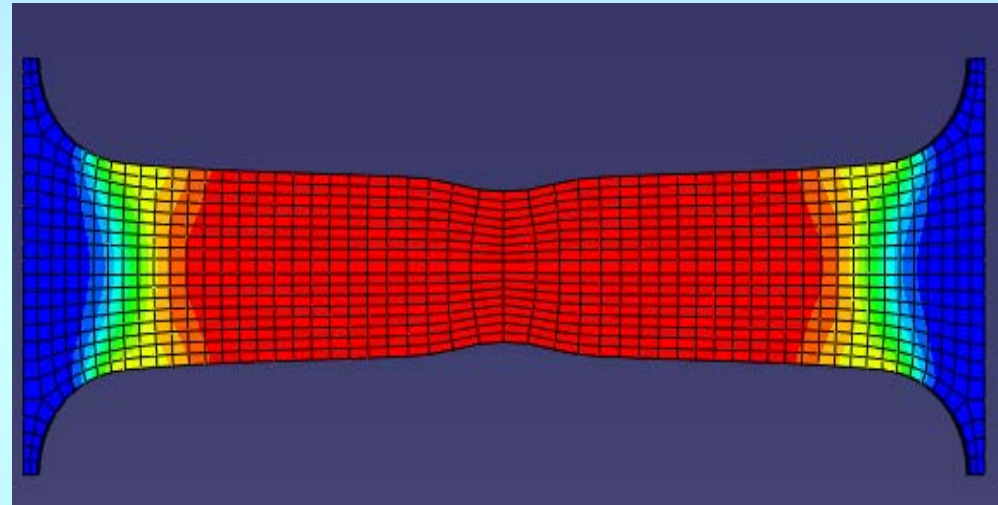


↑ Velocidad ↑ Trabajo plástico
 ↑ T^a ↓ Fase transformada

Transformación de fase

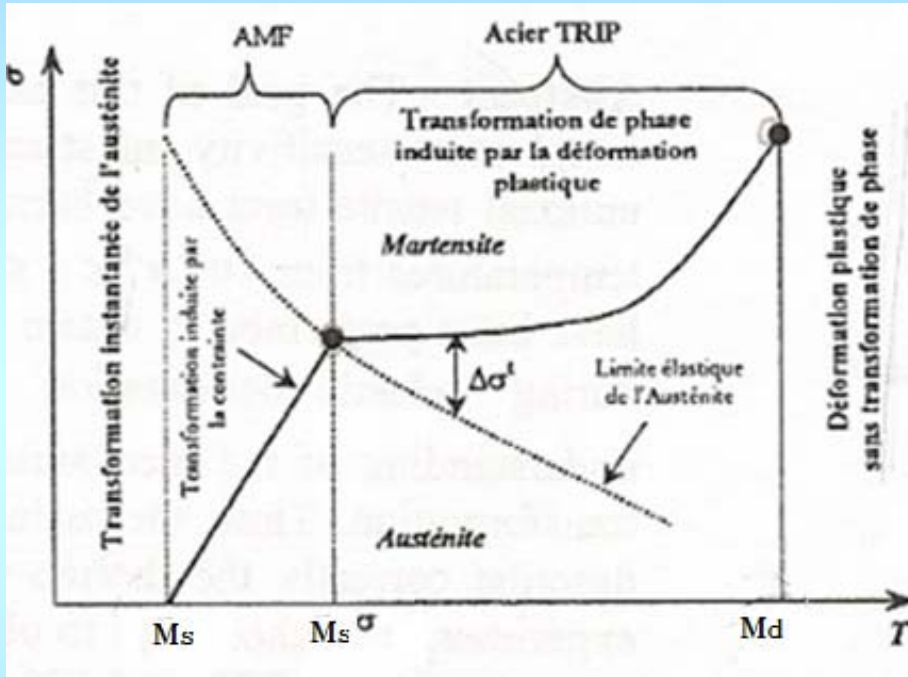


Probeta al principio de la simulación



Probeta al final de la simulación

Influencia de la temperatura

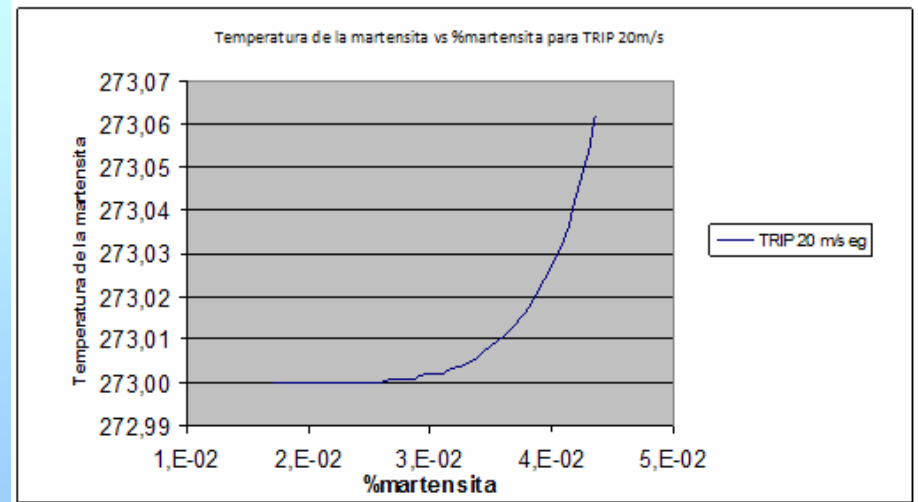
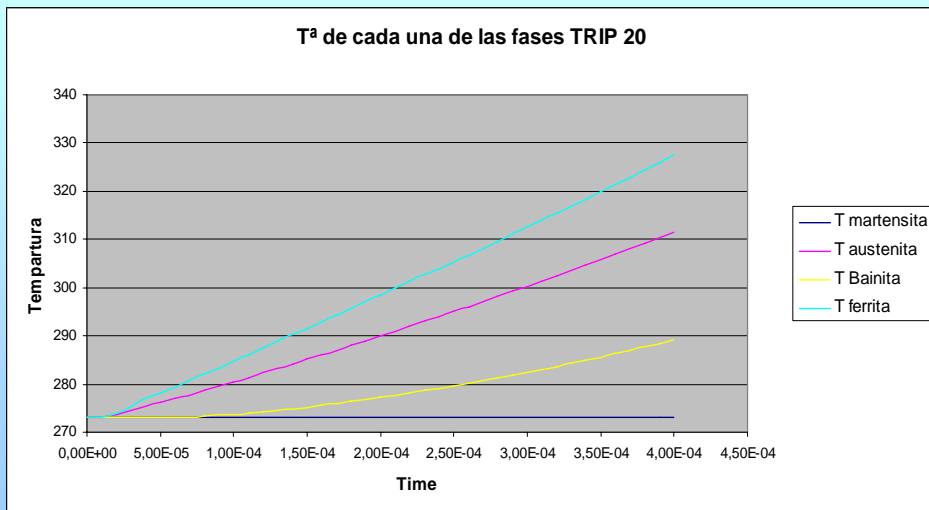
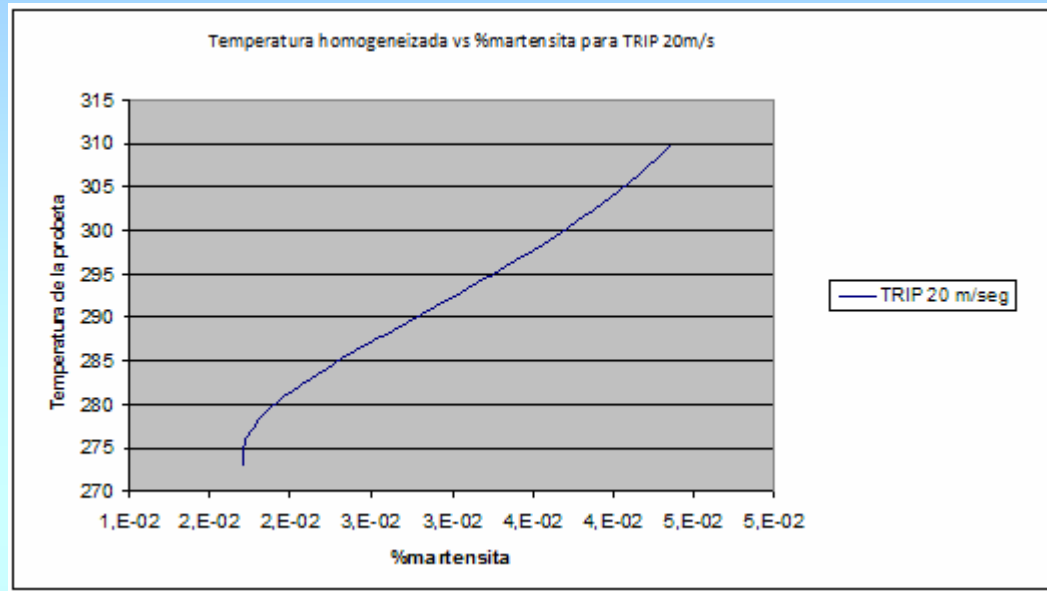


Por debajo de la temperatura M_s la transformación de fase se produce espontáneamente

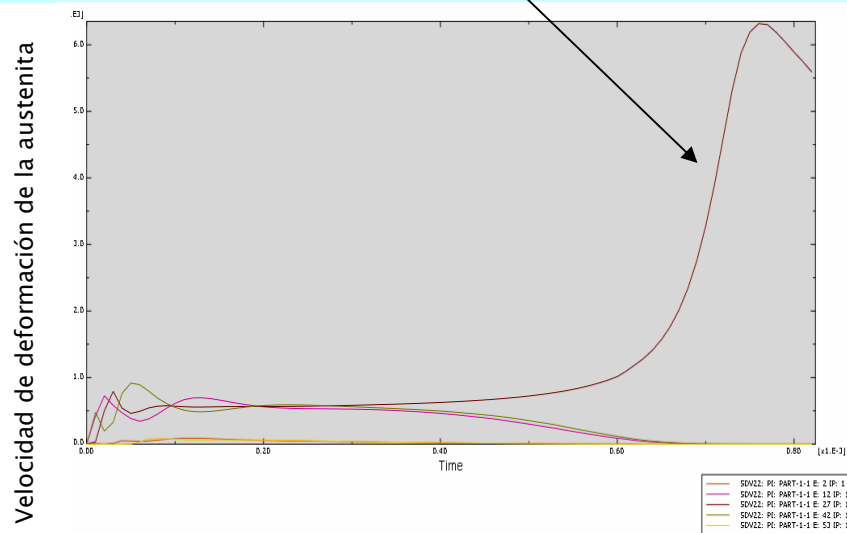
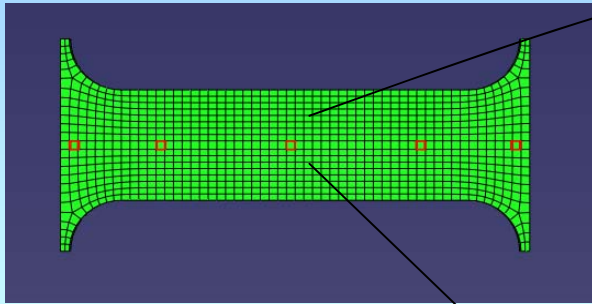
A temperaturas entre M_s^σ y M_d la transformación se produce inducida por deformación

Por encima de M_d no existe transformación de fase

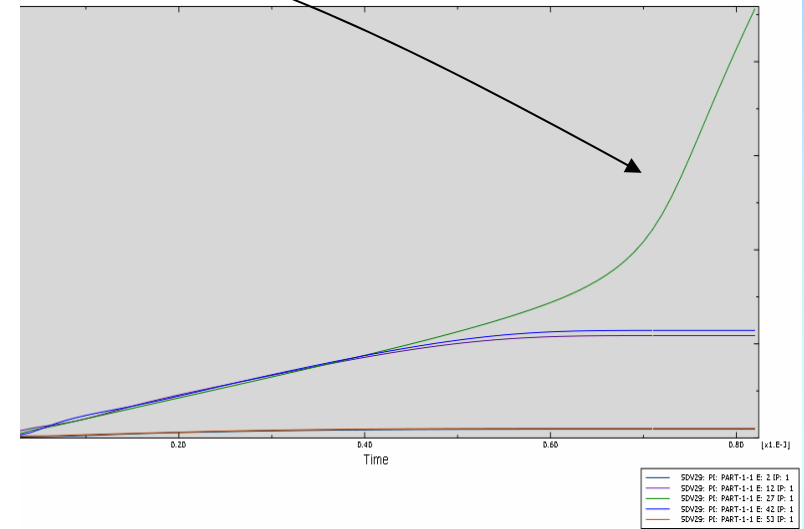
Se puede apreciar como cuando la probeta alcanza una determinada temperatura la transformación de fase se detiene.



Puntos de control



Deformación plástica equivalente total



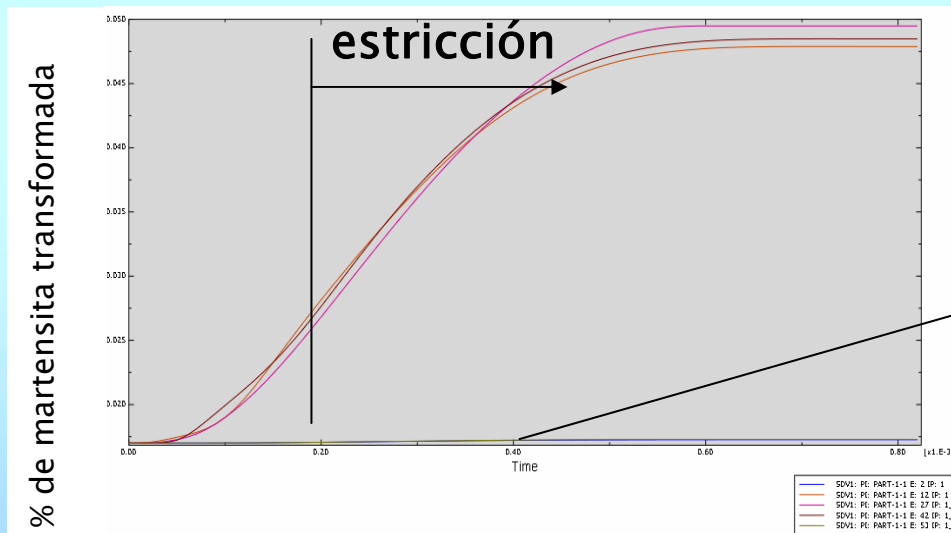
En el centro de la probeta es donde más deformación se produce a medida que se acerca la estricción

La velocidad de deformación de los elementos no centrales se hace cero al llegar a la estricción

La transformación de fase se detiene al llegar a la estricción

La transformación de fase se produce para un rango velocidades de carga y temperatura.

Si la velocidad es demasiado alta, la temperatura se eleva disminuyendo el porcentaje de fase transformada.



Extremos de la probeta:
No existe apenas transformación de fase por no haber deformación apreciable

5. Conclusiones

- El acero TRIP es capaz de soportar mayor carga máxima hasta el momento de la estricción en la probeta.
- Cuanto mayor es la velocidad mayor es la carga soportada. Si se incluye una predeformación inicial en el acero la carga soportada es aún mayor.
- La energía que es capaz de absorber el acero TRIP en un ensayo de tracción uniaxial hasta llegar a la estricción es mayor que para el caso de un acero convencional.
- Cuanto más baja es la velocidad de deformación mayor es la energía absorbida

- El acero TRIP con predeformación no mejora la capacidad de absorción de energía hasta estricción.
- Para que haya transformación de fase tiene que haber un equilibrio entre la velocidad de deformación y la temperatura
- A medida que se aproxima el momento de la estricción en la probeta, la velocidad de deformación aumenta considerablemente en el centro de la misma. Esto produce un aumento en el porcentaje de fase transformada, hasta que es alcanzado un punto en el que la temperatura es demasiado elevada y se detiene dicha transformación.

6. Trabajos futuros

- Estudio otras geometrías y estados de carga como pudiera ser, por ejemplo, un anillo de acero TRIP girando con una determinada velocidad de rotación.
- Mejorar aún más la implementación numérica de manera que el coste computacional fuese menor.
- Proceso de homogeneización, se podría conseguir que fuese más completo.
- TRIP ante fisuras
- Otros estados de predeformación